

Probabilistic Selection Task と予測に基づく 運動制御課題の関連

米田 貢*, 伊藤 萌子**, 菊池 ゆひ*, 太田 哲生***, 少作 隆子*

KEY WORDS

probabilistic selection task, basal ganglia, feed-forward motor control, cerebellum

はじめに

人が生活の中でごく当たり前に行っている、仕事、会話、食事などの生活能力は、生まれてからの学習行動によって獲得される。障害により獲得された生活能力が低下した場合、再適応するための学習行動が必要となる。近年の学習に関する神経科学研究の証拠は、大脳基底核系と小脳系の回路が日常生活や認知活動の遂行に重要なネットワークの基盤であるとの示唆を与える^{1,4)}。学習機能の神経基盤が解明されれば、リハビリテーションの評価や治療方法の開発などに重要な示唆を与えると考える。

大脳皮質－大脳基底核－視床－大脳皮質（大脳基底核系）の回路は、ドーパミンが予測した報酬（快・不快）のズレ（予測誤差信号）として利用されることで行動選択を決定し、強化学習に貢献する^{5,7)}。一方、大脳皮質－小脳－視床－大脳皮質（小脳系）の回路は、日常生活や動作をスムーズに行うために、フィードバック制御とフィードフォワード制御の機能に大きな役割を果たしている。フィードフォワード制御は、内部モデルによって予測に基づく運動指令を生成し、予測とフィードバックされた結果の誤差を小さくすることで学習に寄与しており、運動だけでなく思考や認知機能にも関与することが明らかになっている^{1,6,8,9)}。

これまで大脳基底核と小脳の学習回路は、視床－大脳皮質系への入力がいかに独立して処理され则认为されてきた¹⁰⁾。最近の研究では、霊長類の大脳基底核系と小脳系は、直接的に投射していることが明らかとなり¹¹⁾、人の学習が大脳基底核系と小脳系の相互作用によるとの仮説が示された^{12,13)}。しかしながら、この仮説を支持する明確な証拠は得られていないため、既存の大脳基底核と小脳の回路に依存した学習課題の間に関連が見つかる

ば、これら脳領域の相互作用が人の学習行動にどのような影響をもたらすかを知る手がかりになり、リハビリテーションの治療介入の効果や評価を利用したプログラム立案などに役立つ可能性があると考ええる。

大脳基底核系の回路を用いるProbabilistic Selection Task（以下、PS課題）^{6,14)}は、正解が確率的な状況で二択一の選択を学習する時の、正と負のフィードバックに対する次の行動選択を調べることで、報酬が得られる行動をより選択する「Go学習」と罰を伴う行動を避ける「NoGo学習」のバランスを調べる課題である。小脳系の回路を用いる予測に基づく重り負荷課題（以下、重り課題）^{15,16)}は、自分で重りが手掌に負荷されるタイミングを操作し、手の位置を保持するという簡単な方法で、重りが負荷される前にタイミングに合わせた手の動きで、小脳のフィードフォワード制御を調べる課題である。現在まで、PS課題と重り課題の関連を調べた報告は見当たらない。

本研究は、健康成人を対象に、PS課題と重り課題の成績の関連性を明らかにすることを目的に行った。

方法

1. 対象

対象は20歳代の健康成人16名（男性2名、女性14名）、平均年齢 21.4 ± 2.1 歳、平均教育年数 14.6 ± 0.6 年であった。全員右利きで、精神、神経、運動器疾患の既往のない者とした。対象者には、研究の目的を説明し同意を得て行った。本研究は金沢大学医学倫理審査委員会の承認（承認番号：388, 564）を得て行った。

2. Probabilistic Selection Task (PS課題)

先行研究¹⁴⁾と同様の方法で行った。PS課題は、Probabilistic selection taskソフトウェア(PrSelTask_

* 金沢大学医薬保健研究域保健学系リハビリテーション科学領域

** やわたメディカルセンターリハビリテーション部

*** 浅ノ川総合病院リハビリテーションセンター

U1_V3, 小原医科産業株式会社と共同開発)をタブレット端末(i Pad2, Apple社)にインストールして行った。課題内容は、iPadに2つの写真を提示し、正しいと思う方の写真を選択させるもので、トレーニングとテストの2つのセッションで構成される。写真は、動物、花、風景を用いた(図1)。

トレーニングのセッションは、正解が確率的な写真のペア(A:B=80:20, C:D=70:30, E:F=60:40)を最大300回(60×5)選択させ、高い確率の写真を学習させる。選択行動のフィードバックは、写真の枠の色(正解:緑, 不正解:赤), 音(正解:キンコン, 不正解:ビー), 得点(正解:+1, 不正解:-1)で知らせた(図1A)。制限時間は4秒とし、タイムアウト時に画面全体が赤色に変わること知らせた。3つの各ペアを20回、合計で60回の試行を1サイクルとした。トレーニングを最大5サイクル、あるいは2サイクル目以降に学習基準(A選択率60%以上, C選択率55%以上, E選択率35%以上)に達した場合を1回目のトレーニングセッション終了とした。

テストは、トレーニングと同じ写真を使用し、A~Fの組合せ(計15通り)を1サイクル60回(15ペア×4回)、ランダムな順序・位置で提示し、被験者を選ばせた。テストの時は、フィードバックは行わない。AとBが新規な

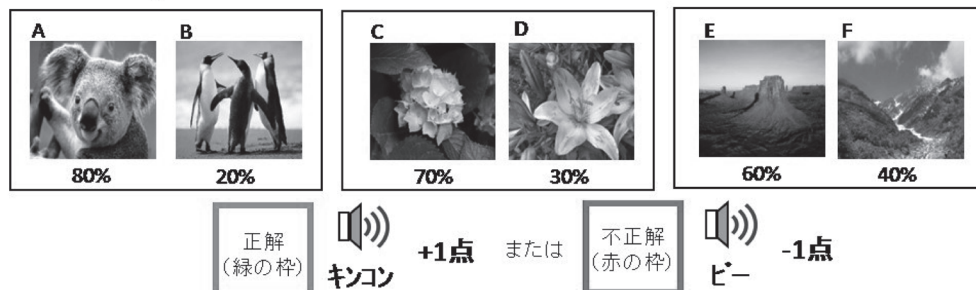
ペア(C, D, E, F)で提示された時に、Aを選択する割合(Choose A)とBを選択しない割合(Avoid B)を調べた。それぞれGo学習, NoGo学習の指標とされる。Go学習とNoGo学習のバランスを調べる指標として、「Choose A - Avoid B」を算出した。

手順は、1回目のトレーニングセッション後、テストを1サイクル、2回目のトレーニングセッションでトレーニングを1サイクル、2回目のテストセッションでテストを1サイクルの順に行い終了とした。各セッション間は1分間の休憩を挟んだ。

3. 予測に基づく重り負荷課題(重り課題)

先行研究¹⁵⁾と同様の方法で行った。重り課題は、バーチャル環境下で手掌に一定の負荷を発生できる装置SPIDAR-G(Space Interface Device for Artificial Reality with Grip, 東京工業大学作製)を使用した(図2A)。SPIDAR-Gは、任意のタイミングで任意の大きさの力をボール(直径60mm)に負荷または脱負荷することができる。SPIDAR-Gのボールの位置情報は、液晶ディスプレイ(LCD-AD191SEB-A, I・O DATA社)の下部にある四角のカーソルと連動して動き、ボールを把持する手を垂直方向に動かすと、手の位置情報がパソコンに出力・記

A. トレーニング



B. テスト

<ペア: 15通り>

AB AC AD AE AF
BC BD BE BF
CD CE CF
DE DF
EF

<Choose A>



※Aを好んで、C, D, E, Fより多く選択する

<Avoid B>



※Bを避けて、C, D, E, Fを多く選択する

図1 probabilistic selection task.

A. トレーニング. AB, CD, EFの写真のペアを提示して正しいと思う写真を選択させる。正解は確率的でA:80%, C:70%, E:60%となっており、被験者は確率の高い写真をより選ぶことを求められる。フィードバックは、写真の枠の色(正解:緑, 不正解:赤), 音(正解:キンコン, 不正解:ビー), 得点(正解:+1, 不正解:-1)で知らせる。B. テスト. AからF全てのペア(AB, AC, AD, AE, AF, BC, BD, BE, BF, CD, CE, CF, DE, DF, EF, 計15通り)を用いる。トレーニングと同様に写真を選択するが、フィードバックはない。確率の高いAの写真新しいペア(下線; AC, AD, AE, AF)で提示された場合、Aを選択する割合をChoose Aとする。確率の低いBの写真を新しいペア(下線; BC, BD, BE, BF)で提示された場合に、B以外の写真を選択する割合をAvoid Bとする。それぞれGo学習, NoGo学習の指標とされる。

録される(図2B)。課題は、プログラムで制御し、被験者がキーボードのEnterキーを一度押すと把持したボールに4.9N(500gの重さに相当)の力が下方方向に負荷される。もう一度Enterキーを押すとパソコン画面のボールが黒い四角形から消え、それに伴って把持したボールに加えられた力が除かれる。これを1試行とし、10試行を行った。被験者は、椅子座位で前腕(利き手)を台に乗せ、前腕回外位でボールを把持する。この時、両足底が床に接地し、肘関節60-90°屈曲位になるよう座面の高さを調整した。手の動きが最小となるよう「黒い四角が青いバーから出ないように」と指示した。

位置波形は、負荷後の手の動きの振幅が一定となる、6試行目から10試行目までの5試行分を解析に使用した¹⁵⁾。位置波形は、負荷の200ms前の位置を基準とし、負荷のタイミングでの上向きの振れ幅を先行反応(mm)と定義した(図2C)。また、負荷後の下向きの振れ幅(mm)を算出した(図2D)。

3. 統計処理

データは平均値±標準偏差で示した。PS課題のChoose A(%), Avoid B(%), Choose A - Avoid B(%)と、重り課題の先行反応(mm)、下向きの振れ幅(mm)のそれぞれの間の相関はピアソンの相関係数を用いた。有意水準は、5%とした。

結果

PS課題と重り課題の成績を表1に示す。各測定項目間の相関(表2)を調べたところ、Choose A - Avoid Bと先行反応の間に $r = -0.68$ ($P < 0.01$)と強い負の相関を認め、PS課題と重り課題の成績に関連を見いだした(図3)。また、課題内では、PS課題のChoose AとAvoid Bの間に $r = 0.67$ ($P < 0.05$)と強い正の相関を認めた。

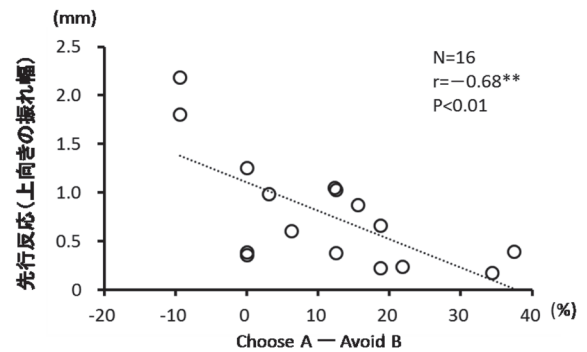
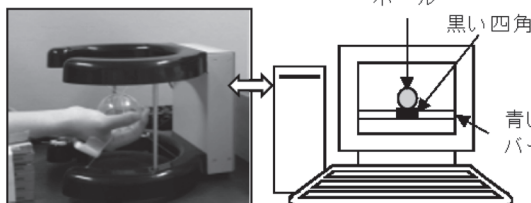


図3 「Choose A - Avoid B」と先行反応の関係。ピアソンの相関係数。*: $P < 0.01$ 。

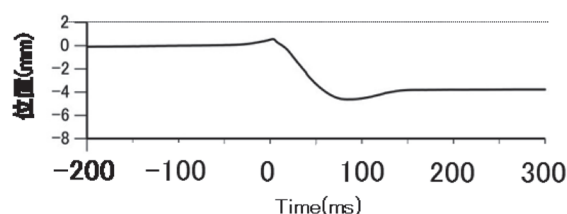
考察

本研究では、大脳基底核系の働きであるGo/NoGo学習のバランスを調べるPS課題と、小脳系の働きであるフィードフォワードの運動制御を調べる重り課題を用いて、大脳基底核系と小脳系の学習回路に関連性について、

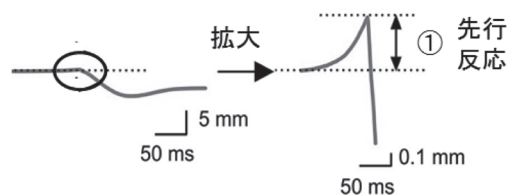
A. SPIDAR-G



B. 位置波形の例



C. 負荷のタイミングでの上向きの手の動き; 先行反応



D. 負荷後の下向きの手の動き: 振れ幅

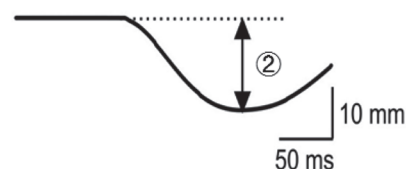


図2 予測に基づく重り負荷課題。

A. Space Interface Device for Artificial Reality-Grip (SPIDAR-G)。装置にはモータに繋がれたボール(直径60mm)に一定の負荷を発生させることができる。SPIDARはバーチャル環境下(空間およびPCのモニター上)で人が知覚情報を得られる。モニターにはSPIDARと連動したボールと、手をイメージさせる黒い四角が表示されている。被験者は、黒い四角が青い帯(バー)の範囲から出ないようにして、手の位置が動かないように求められる。サンプリング周波数1kHzでPCに記録される。B. 位置データの例。SPIDARで取り込まれた位置情報を波形に示した。重り負荷のタイミングを $t = 0$ とし、-200から300msの区間を抽出した。C. 先行反応。重りが負荷されたタイミングの記録波形は、ほとんど変化していないように見えるが、拡大すると重りが負荷される前に上向きの手の動きが観察される。この上向きの振れ幅(矢印の範囲①)は、フィードフォワード制御を示す先行反応と定義される。D. 下向きの振れ幅。重りが負荷された後、一度大きく手が下向きに下がる(矢印の範囲②)。

表1 PS課題および重り課題の成績

測定項目	成績(N=16)
PS課題	
Choose A (%)	80.7 ± 16.6
Avoid B (%)	69.7 ± 18.8
Choose A – Avoid B (%)	10.9 ± 13.2
SPIDAR	
先行反応(mm)	0.78 ± 0.57
下向きの振れ幅(mm)	7.92 ± 4.19

表2 PS課題と重り課題の関連

測定項目	Choose A	Avoid B	Choose A – Avoid B	先行反応	下向きの振れ幅
Choose A		0.67*	0.33	-0.24	-0.33
Avoid B			-0.48	-0.37	-0.31
Choose A – Avoid B				-0.68**	0.12
先行反応					-0.20
下向きの振れ幅					

*P<0.05, **P<0.01 (ピアソンの相関係数)

それぞれの回路に依存した学習課題で調べた。結果は、Go/NoGoのバランスを示す「Choose A – Avoid B」と予測機能が上手く働いているかを示す「先行反応」の間に有意な負の相関を見いだした。学習課題における関連を直接的に示した報告はなく、本研究結果は、新しい知見といえる。

本研究では、PS課題におけるChoose AとAvoid Bの間に、正の相関を認めた。若年健常者を対象とした先行研究では、「Choose A – Avoid B」値は、バランスが良いとされる範囲に収まるとの報告がある¹⁷⁾。つまり、Go/NoGoのバランスが良い場合、Choose Aが増大すればAvoid Bも増大し、その逆も同様ということになり、本研究結果は先行研究を支持する結果といえる。

近年、大脳基底核と小脳は、ネットワークを形成し並列に機能することで、相互作用の関係にあるとする仮説が報告されている^{12,13)}。しかしながら、1つの学習課題を用いて、大脳基底核と小脳の並列に機能している証拠を示した報告はまだ見当たらない。

本研究でPS課題と重り課題の成績に負の強い相関を認めたことは、大脳基底核系と小脳系の関連を反映した結果である可能性がある。先行反応は、予測情報を上手く

利用していることを示していると考え、PS課題に限らず、課題や動作の学習が早く、上手く適応できる機能を備えていることを表現している可能性がある。しかし、先行反応と認知課題や動作課題との関連を明らかにした報告はなく、今後の課題である。また、PS課題のChoose A、Avoid Bについても、認知機能の低下が指摘される神経疾患や精神疾患で健常者と異なるパターンを示すことが報告されているが、行動学習や生活能力との関連は明らかにされていない。本研究結果の先行反応と「Choose A – Avoid B」が負の相関関係にあったことは、先行反応が小さいとChoose Aが高く、先行反応が大きいとAvoid Bが低いという関係を表している可能性が示唆される。

今回の結果は、対象者数が16名と少なく、今後は、対象者数、年齢を広げるとともに、リハビリテーションと関連が深い作業の学習や大脳基底核系および小脳系の機能低下を示す神経・精神疾患患者についても調査していく必要がある。さらに、本研究で見いだされた所見と、fMRI研究、行動や生活能力との関連性などを明らかにしていくことで、リハビリテーションの評価やプログラム立案に有用な示唆を与えることが期待される。

引用文献

- 1) Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, et al : Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403 : 192-195, 2000
- 2) Doya K : Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. *Curr Opin Neurobiol.* 10 : 732-739, 2000
- 3) 高草木薫 : 大脳基底核による運動の制御. *臨床神経学* 49 : 325-334, 2009
- 4) 谷脇考恭, 飛松省三 : 小脳の機能. *分子精神医学* 7 : 37-44, 2007
- 5) Schultz W : Behavioral dopamine signals. *Trends Neurosci.* 30 : 203-210, 2007
- 6) Frank MJ, Seeberger LC, O'reilly RC : By carrot or by stick : cognitive reinforcement learning in parkinsonism. *Science* 306 : 1940-1943, 2004
- 7) Nakahara H : Multiplexing signals in reinforcement learning with internal models and dopamine. *Curr Opin Neurobiol* 25 : 123-129, 2014
- 8) Kawato M : Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol* 9 : 718-727, 1999
- 9) Ito M : Control of mental activities by internal models in the cerebellum. *Nat Rev Neurosci* 9 : 304-313, 2008
- 10) Middleton FA, Strick PL : Basal ganglia output and cognition : evidence from anatomical, behavioral, and clinical studies. *Brain Cogn*, 42 : 183-200, 2000
- 11) Hoshi E, Tremblay L, Féger J, et al. : The cerebellum communicates with the basal ganglia. *Nat Neurosci* 8 : 1491-1493, 2005
- 12) Bostan AC, Dum RP, Strick PL : Cerebellar networks with the cerebral cortex and basal ganglia. *Trends Cogn Sci* 17 : 241-254, 2013
- 13) Dasgupta S, Wörgötter F, Manoonpong P : Neuromodulatory adaptive combination of correlation-based learning in cerebellum and reward-based learning in basal ganglia for goal-directed behavior control. *Front Neural Circuits.* 8 : e126, 2014
- 14) 米田貢, 照井希実, 藤井己浦, 他 : Probabilistic Selection Taskの日本人への応用およびその信頼性の検討. *作業療法* 35 : 289-300, 2016
- 15) Kikuchi Y, Yoneda M, Ohno-Shousaku T : Impaired anticipatory hand movement during a loading task in patients with schizophrenia. *J Tsuruma health science society* 38 : 2014
- 16) Koike Y, Kim J, Duk S : Role of stiffness in weight perception. *Japanese Psychological Research*, 48 : 174-187, 2006
- 17) Simon JR, Howard JH, Howard DV : Adult age differences in learning from positive and negative probabilistic feedback. *Neuropsychology* 24 : 534-541, 2010

The relationship between probabilistic selection task and motor prediction during a loading task

Mitsugu Yoneda*, Moeko Ito**, Yui Kikuchi*, Tetsuo Ota***, Takako Ohno-Shosaku*